

УДК 621.313

# РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО РЕЖИМА ЛИНЕЙНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

*В. И. Милых, д.т.н., проф., С. В. Ткаченко, асп.*

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»*

*ул. Фрунзе, 21, 61002, г. Харьков, Украина*

*E-mail: mvi@kpi.kharkov.ua*

Представлена математическая модель линейного электродвигателя для сейсморазведки, соответствующая режиму ударного силового импульса. Ее особенностью является использование нелинейных трехпараметрических функций дифференциальных индуктивных параметров обмоток и электромагнитной силы взаимодействия реактора и якоря. Проведен расчет рабочего режима, и результаты сопоставлены с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** линейный электродвигатель, математическая модель, расчет, экспериментальные данные.

**Введение.** Линейный импульсный электродвигатель (ЛИЭД) рассматриваемого типа [1, 2] предназначен для сейсморазведки полезных ископаемых. Его упрощенная схема показана на рис. 1, а подробнее он представлен в [1–3].

При подаче импульсов токов  $i_r$  и  $i_a$  в обмотки взаимодействие реактора и якоря порождает электромагнитную силу  $F_{em}$ . Якорь движется со скоростью  $v_a$  и через опорную плиту производит ударное воздействие на грунт, а инерционный реактор со скоростью  $v_r$  отскакивает вверх.

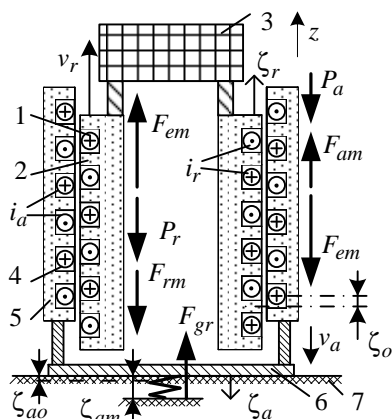


Рисунок 1 – Схема активной силовой части ЛИЭД: 1, 2, 3 – обмотка, сердечник и инерционная масса реактора; 4, 5, 6 – обмотка, сердечник и опорная плита якоря; 7 – грунт

Математическая модель и расчетный анализ ударного режима работы ЛИЭД были представлены в [2], где рассматривался вариант его питания от одного источника при последовательном соединении обмоток реактора и якоря.

**Цель работы.** Представление расчетно-экспериментальных исследований ЛИЭД с независимым питанием обмоток с учетом совокупности электромагнитных, механических и тепловых процессов.

**Материал и результаты исследований.** Электрическая схема замещения ЛИЭД при независимом питании обмоток представлена на рис. 2, где индексы  $r$  и  $a$  в обозначениях параметров соответствуют реактору и якорю.

Обмотки реактора и якоря представлены сопротивлениями  $R_r$  и  $R_a$ , индуктивностями  $L_r$  и  $L_a$ , а также через коэффициенты взаимной индуктивности  $M_{ra}$  и  $M_{ar}$  учитывается их магнитная связь. Индуктивные параметры рассматриваются как дифференциальные и являются сложными нелинейными трехпараметрическими функциями, так как ввиду движения и наличия сильнонасыщенных ферромагнитных сердечников зависят от токов  $i_r$  и  $i_a$ , а также от взаимного смещения  $\zeta$  реактора и якоря. Представлены также сопротивления  $R_{cr}$ ,  $R_{ca}$  и индуктивности  $L_{cr}$ ,  $L_{ca}$  подводящих кабелей. Все сопротивления нелинейны, так как зависят от изменяющихся температур обмоток.

Конденсаторные накопители энергии имеют емкости  $C_{Er}$ ,  $C_{Ea}$  и начальные значения  $U_{Cro}$ ,  $U_{Cao}$  изменяющихся напряжений  $u_{Cr}$  и  $u_{Ca}$ .

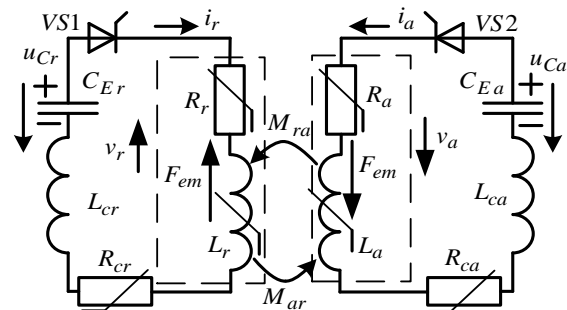


Рисунок 2 – Электрическая схема замещения ЛИЭД

По сравнению с имеющимся аналогом [2], математическая модель ЛИЭД многократно усложняется из-за наличия упоминавшихся трехпараметрических функций дифференциальных индуктивных параметров, а также подобной функции силы  $F_{em}$ . Но практически вариант с независимым питанием обмоток ЛИЭД позволяет снизить уровень напряжения в два раза и, тем самым, повысить электробезопасность в условиях эксплуатации. Поэтому именно такой вариант принят для созданного экспериментального образца ЛИЭД.

**Математическая модель ЛИЭД.** Электромагнитные процессы в рабочем режиме ЛИЭД в соответствии с его электрической схемой замещения (рис. 2) описываются уравнениями:

$$\frac{d\Psi_r}{dt} + L_{cr} \frac{di_r}{dt} + \frac{1}{C_{Er}} \int_0^t i_r dt = U_{Cro} - u_{Rr}; \quad (1)$$

$$\frac{d\Psi_a}{dt} + L_{ca} \frac{di_a}{dt} + \frac{1}{C_{Ea}} \int_0^t i_a dt = U_{Cao} - u_{Ra}, \quad (2)$$

где  $\Psi_r$ ,  $\Psi_a$  – результирующие магнитные потоко-  
сцепления (МПС) обмоток реактора и якоря, склады-  
вающиеся из собственных и взаимных МПС;  
 $u_{Rr} = i_r(R_r + R_{cr})$ ,  $u_{Ra} = i_a(R_a + R_{ca})$  – падения на-  
пряжения.

С учетом трехпараметрических зависимостей  
МПС их производные преобразуется к виду:

$$\frac{d\Psi_r}{dt} = \frac{\partial\Psi_r}{\partial\zeta} \cdot \frac{d\zeta}{dt} + \frac{\partial\Psi_r}{\partial i_r} \cdot \frac{di_r}{dt} + \frac{\partial\Psi_r}{\partial i_a} \cdot \frac{di_a}{dt}; \quad (3)$$

$$\frac{d\Psi_a}{dt} = \frac{\partial\Psi_a}{\partial\zeta} \cdot \frac{d\zeta}{dt} + \frac{\partial\Psi_a}{\partial i_a} \cdot \frac{di_a}{dt} + \frac{\partial\Psi_a}{\partial i_r} \cdot \frac{di_r}{dt}. \quad (4)$$

где выделяются дифференциальные собственные и  
взаимные индуктивности  $L_r = \frac{\partial\Psi_r}{\partial i_r}$ ;  $L_a = \frac{\partial\Psi_a}{\partial i_a}$ ;

$M_{ra} = \frac{\partial\Psi_r}{\partial i_a}$ ;  $M_{ar} = \frac{\partial\Psi_a}{\partial i_r}$ , а также коэффициенты, ко-  
торые для удобства названы условно индуктивностя-  
ми движения  $L_{r\zeta} = \frac{\partial\Psi_r}{\partial\zeta}$ ;  $L_{a\zeta} = \frac{\partial\Psi_a}{\partial\zeta}$ .

Баланс сил в механической системе ЛИЭД  
(рис. 1) описывается на основе уравнений:

$$F_{em} = P_r + F_{mr}; F_{em} = F_{ma} + F_{gr} - P_a, \quad (5)$$

где кроме  $F_{em}$  представлены силы инерции  
 $F_{mr} = m_r a_r$ ,  $F_{ma} = m_a a_a$  и их весовые силы  
 $P_r = m_r g_{gr}$ ,  $P_a = m_a g_{gr}$ , где  $m_r$ ,  $m_a$ ,  $a_r$ ,  $a_a$  – мас-  
сы и ускорение движения реактора и якоря;  $g_{gr}$  –  
гравитационная постоянная;  $F_{gr}$  – сила реакции  
грунта, для которой была принята [2] гипотетическая  
зависимость от осевого смещения якоря.

Тепловой процесс в обмотках и кабелях в течение  
кратковременного рабочего импульса считается адиа-  
батическим и описывается соответствующими урав-  
нениями [2].

Необходимые для решения системы представлен-  
ных уравнений трехпараметрические функции МПС  
 $\Psi_r(\zeta, i_r, i_a)$ ,  $\Psi_a(\zeta, i_r, i_a)$  и силы  $F_{em}(\zeta, i_r, i_a)$  были  
получены, как и в [2, 4], численно-полевыми расчета-  
ми с использованием программы FEMM [5]. Это, а  
также последующее оперирование с частными произ-  
водными МПС, оказалось наиболее сложной частью  
расчета переходного процесса, характеризующего  
импульсный рабочий режим ЛИЭД. Принципы пре-  
одоления этой проблемы заложены в [2,4], но теперь  
задача еще многократно усложнилась ввиду перехода  
от двух- к трехпараметрическим функциям.

Расчет и сравнение результатов с эксперимен-  
тальными данными. Конструктивные параметры  
ЛИЭД в целом соответствуют представленным в [1 –  
6], то есть зазор между сердечниками реактора и яко-  
ря – 2 мм; диаметр по зазору  
– 416 мм; длина сердечников – 533 мм;  $m_a = 750$  кг;

$m_r = 1500$  кг, общая высота – 2,6 м;  
 $U_{Cro} = U_{Cao} = 600$  В;  $C_{Er} = C_{Ea} = 0,17$  Ф.

В соответствии с представленной математической  
моделью, расчеты импульсного рабочего режима  
ЛИЭД были проведены на ЭВМ с использованием  
метода Рунге-Кутты IV порядка. Был получен и про-  
анализирован целый ряд функции электрических, ме-  
ханических и других величин, характеризующих про-  
текание переходного процесса в рабочем интервале.

Оценка эффективности работы ЛИЭД, как источ-  
ника сейсмоколебаний, проводилась по амплитудам и  
длительности действия сил, импульсам вырабатывае-  
мой силы и силового воздействия непосредственно на  
грунт, а также по КПД, суть которых рассматривалась  
и раньше [2].

Результаты расчетов подтверждены рядом функ-  
ций и параметров, которые были измерены на дейст-  
вующем натурном образце ЛИЭД.

**Выводы.** Представленная математическая модель  
рабочего режима ЛИЭД является достаточно уни-  
кальной, так как основана на использовании сложных  
нелинейных трехпараметрических функций МПС,  
дифференциальных индуктивностей и взаимоиндук-  
тивностей, а также и электромагнитной силы. Чис-  
ленная реализация этой модели позволяют эффектив-  
но исследовать динамический импульсный режим ра-  
боты ЛИЭД с независимым включением обмоток ре-  
актора и якоря, что подтверждено данными экспери-  
ментальных исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бару Ю.А., Мельник А.К., Ткаченко С.В., Ми-  
лых В.И. Выбор типа и основных параметров линей-  
ного импульсного электродвигателя для невзрывных  
сейсмоисточников // *Электротехніка і електромехані-  
ка*. – 2008. – № 3. – С. 41 – 44.
2. Милых В.И., Ткаченко С.В. Алгоритмизирован-  
ная математическая модель линейного импульсного  
электродвигателя как ударного источника слабых  
сейсмических колебаний // *Электротехніка і електро-  
механіка*. – 2011. – № 1. – С. 33 – 38.
3. Милых В.И., Ткаченко С.В. Силовые взаимо-  
действия в линейном электродвигателе для источни-  
ков сейсмических колебаний // *Электротехніка і елек-  
тромеханіка*. – 2008. – № 6. – С. 36 – 39.
4. Милых В.И., Ткаченко С.В. Математическое  
обеспечение численного анализа импульсного возбу-  
ждения линейного электродвигателя с двухпарамет-  
рической функцией магнитного потоко-сцепления //  
*Вісник Кременчуцького державного університету  
імені Михайла Остроградського*. – Кременчук: КДУ.  
– 2010. – Вип. 3/2010 (62), ч. 2.  
– С. 70 – 73.
5. Meeker D. Finite Element Method Magnetics. Ver-  
sion 4.2. User's Manual, September 26, 2006  
// <http://femm.berlios.de>, 2005.
6. Милых В.И., Ткаченко С.В. Анализ влияния ме-  
ханических параметров линейного электродвигателя  
на эффективность его работы как источника сейсми-  
ческих колебаний // *Гірн. електромеханіка та автома-  
тика: Наук.-техн. зб.* – 2010. – Вип. 85.  
– С. 124 – 130.